

SÉRIE A, N° 322.

N° D'ORDRE

981.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR LE GRADE

DE

DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. J. CAURO

Ancien élève de l'École polytechnique. — Agrégé des Sciences physiques
Préparateur au laboratoire des recherches physiques à la Sorbonne.

1^{re} THÈSE. — MESURES SUR LE MICROPHONE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 27 mars 1899, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, Président.

DITTE,

PELLAT,

} Examineurs.

PARIS

GEORGES CARRÉ ET C. NAUD, ÉDITEURS

3, RUE RACINE, 3

1899



SÉRIE A, N° 322.

N° D'ORDRE

981.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR LE GRADE

DE

DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. J. CAURO

Ancien élève de l'École polytechnique. — Agrégé des Sciences physiques
Préparateur au laboratoire des recherches physiques à la Sorbonne.

1^{re} THÈSE. — MESURES SUR LE MICROPHONE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 28 mars 1899, devant la Commission d'Examen.

MM. LIPPMANN, Président.

DITTE,

PELLAT,

} Examinateurs.



PARIS

GEORGES CARRÉ ET C. NAUD, ÉDITEURS

3, RUE RACINE, 3

1899

UNIVERSITÉ DE PARIS

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

MM.

Doyen	DARBOUX, Professeur . .	Géométrie supérieure.
Professeur honoraire.	HERMITE.	
	DE LACAZE-DUTHIERS .	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	TROOST.	Chimie.
	FRIEDEL.	Chimie organique.
	LIPPMANN.	Physique.
	HAUTEFEUILLE	Minéralogie.
	BOUTY	Physique.
	APPELL	Mécanique rationnelle.
	DUCLAUX	Chimie biologique.
	BOUSSINESQ	Physique mathématique et calcul des probabi- lités.
	PICARD	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
Professeurs.	POINCARÉ.	Astronomie mathéma- tique et Mécanique céleste.
	YVES DELAGE	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	BONNIER	Botanique.
	DASTRE.	Physiologie.
	DITTE	Chimie.
	MUNIER-CHALMAS . . .	Géologie.
	GIARD.	Zoologie, Évolution des êtres organisés.
	WOLF.	Astronomie physique.
	KÖNIGS.	Mécanique physique et expérimentale.
	VÉLAIN.	Géographie physique.
	GOUSAT.	Calcul différentiel et Calcul intégral.
Professeurs adjoints .	CHATIN	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	PELLAT.	Physique.
	PUISEUX	Mécanique et Astrono- mie.
Secrétaire	FOUSSEREAU.	

A MES MAITRES

M. A. CORNU ET M. G. LIPPMANN

MEMBRES DE L'INSTITUT

Hommage de vive admiration et de respectueux dévouement.

MESURES

SUR LE

MICROPHONE

AVANT-PROPOS

Il n'existe pas de travail d'ensemble portant sur la mesure des divers éléments tant électriques qu'acoustiques qui interviennent dans la transmission du son par le microphone. L'ordre de grandeur de la plupart des quantités en jeu est même inconnu.

Je me suis proposé de mesurer :

1° Dans le circuit primaire :

La variation alternative et la variation moyenne de l'intensité du courant.

J'ai cherché si elle pouvait être considérée comme due à une simple variation de la résistance du microphone ou si elle provenait d'une force électromotrice, indépendante du courant principal, tel qu'un effet thermo-électrique ou un effet de polarisation.

2° Dans le circuit secondaire :

La force électromotrice induite dans la bobine en circuit ouvert.

L'intensité du courant engendré.

La différence de potentiel aux bornes du téléphone.

L'énergie électrique dépensée dans le téléphone.

J'ai cherché comment ces quantités variaient avec l'amplitude du son, puis avec la période. J'ai donc dû pouvoir mesurer à un instant donné l'amplitude de la vibration d'une onde aérienne. C'est-à-dire que j'ai été conduit à la mesure des intensités sonores.

J'ai étudié quelle était la grandeur des mouvements de la membrane du téléphone et de la plaque du microphone, puis quelle était la nature de ce mouvement (si c'était un mouvement d'ensemble, une division en concamérations).

L'extrême petitesse des effets à mesurer m'a obligé soit à modifier les appareils de mesure pour pousser plus loin qu'on ne l'a fait jusqu'ici leur sensibilité, soit à employer des appareils nouveaux. La plus grande partie de ces recherches sera donc consacrée à l'étude des appareils et des méthodes de mesure.

Ce travail est divisé en cinq chapitres :

CHAPITRE PREMIER. — Les appareils servant aux mesures électriques.

CHAPITRE II. — Les appareils servant aux mesures acoustiques.

CHAPITRE III. — Les méthodes de mesure.

CHAPITRE IV. — Les résultats.

CHAPITRE V. — Conclusions.

Je dirai d'abord deux mots des travaux qui ont paru sur la question.

HISTORIQUE

En 1881, Boudet de Paris ⁽¹⁾ a mesuré la variation moyenne de résistance d'un microphone actionné soit par les chocs d'un métronome, soit par les vibrations de la voix humaine.

Le courant d'une pile se partageant en deux, passait d'une part dans le microphone, d'autre part dans une résistance variable. Les deux courants dérivés actionnaient différentiellement un appareil galvanométrique. Lorsque l'équilibre était atteint, la résistance moyenne du microphone était équivalente à celle lue sur la boîte de résistance.

L'auteur n'a pas mesuré la variation alternative de la résistance qui est la plus intéressante, puisque c'est elle qui intervient dans la production du courant secondaire dans le cas de la transmission des sons musicaux. Il explique le peu de concordance de ses mesures par le fait que dans le cas de la voix humaine les résultats peuvent être faussés par la chaleur de l'haleine.

M. Pellat en 1881 ⁽²⁾, en lançant dans un téléphone la

⁽¹⁾ *Lumière Électrique*, 1881.

⁽²⁾ *Journal de Physique*, 1881.

charge et la décharge d'un condensateur au moyen d'un trembleur et en s'arrageant de façon à ce qu'elles fussent complètes mesura l'énergie électrique absorbée dans le téléphone.

Il trouva que l'énergie correspondant à une petite calorie lancée dans le téléphone permettrait d'obtenir un son continu perceptible pendant dix mille ans.

Giltay, en 1885, donna un appareil (dont le principe avait été indiqué par Bellati) qui est sensible aux courants téléphoniques.

Mais l'instrument ne peut pas facilement être étalonné et Giltay ne fit aucune mesure.

MM. Estaunié et Brilynsky ⁽¹⁾ en 1889 mesurèrent l'intensité du courant le plus faible qui pouvait faire parler un téléphone. Ils produisaient le son par une roue de Savart dont les dents venaient frapper une carte. Cette carte à chaque oscillation fermait un circuit et envoyait dans un galvanomètre une partie toujours de même sens du courant étudié.

Ils trouvèrent ainsi pour intensité limite une fraction de millionième d'ampère, résultat qui avait été indiqué théoriquement par Bosscha.

Les sons dont ils se servaient étaient graves et au-dessous des sons moyens de la voix humaine (ils n'atteignaient pas 200 périodes).

Il est difficile d'admettre que l'emploi de l'interrompteur vibrant présente toute sécurité. Il suffit d'un

(1) *Lumière Électrique*, 1889.

défaut de contact pour fausser la lecture. Enfin le choc de la carté sur le butoir qui doit être assez fort pour que le contact soit certain peut introduire des forces électromotrices thermo-électriques capables de donner des courants de l'ordre de grandeur de ceux qu'il s'agit de mesurer.

Lord Rayleigh en 1894, chercha à son tour le courant minimum capable d'influencer un téléphone. Il produisait dans une bobine par la rotation d'un aimant une force électromotrice qu'il pouvait calculer et il augmentait la résistance du circuit qui comprenait le téléphone, au moyen de résistances en plombagine ⁽¹⁾, jusqu'au moment où il n'entendait plus rien.

Il trouva des valeurs limites voisines du millionième d'ampère.

(1) Il constata à cette occasion l'effet de la capacité électro-statique des bobines, qui comme je l'ai montré expérimentalement est considérable dans le cas des grandes résistances et peut arriver à leur donner une self-induction apparente négative.

CHAPITRE PREMIER

APPAREILS SERVANT AUX MESURES ÉLECTRIQUES

- 1° *Mesures en courant alternatif.* — Mesures des différences alternatives de potentiel par l'électromètre Curie. — Mesure des intensités des courants alternatifs. — Étude de l'électrodynamomètre de Giltay. Ses inconvénients. Sa transformation en un appareil plus sensible dans le cas des méthodes de zéro. — Un nouvel oscillographe. Sa transformation en relai microphonique.
- 2° *Mesures en courant continu.* — Mesure d'une différence de potentiel et de l'intensité d'un courant.

1° MESURES EN COURANT ALTERNATIF

Mesures des différences alternatives de potentiel par l'électromètre Curie. — L'électromètre Curie présente le très grand avantage de supprimer l'amortisseur à liquide qui en raison des phénomènes capillaires, donne toujours un mauvais zéro. Je me suis contenté d'accroître la sensibilité de l'appareil, en diminuant l'inertie du système mobile par l'emploi d'une aiguille très légère et d'un miroir de très petit diamètre, en affaiblissant le couple de torsion par l'augmentation de la longueur du fil qui avait un mètre, et en augmentant la précision des pointés optiques.

On peut pour observer les déviations se servir soit d'un miroir concave avec lequel on forme une image réelle que l'on pointe au microscope, soit d'un miroir

plan donnant une image virtuelle et éloignée que l'on vise avec une lunette.

La méthode du microscope paraît comporter une précision plus grande. On peut facilement évaluer $\frac{1}{500}$ de mm sur l'image donnée par un miroir de 2 m de rayon, ce qui correspond à une déviation de $0'',04$ d'arc et à une rotation du miroir de $0'',02$ d'arc. Avec les miroirs légers⁽¹⁾ dont on se sert, l'image est généralement mauvaise. On peut prendre comme objet lumineux un fil de verre très fin, vivement éclairé, qui donne des raies de diffraction très nettes, et observer avec un oculaire muni d'un micromètre.

Seulement, la mise au point est extrêmement pénible : de plus et surtout, la rotation de l'équipage mobile est toujours accompagnée d'une translation qui suffit pour faire perdre l'image (une variation de $\frac{1}{200}$ de mm suffisant pour détruire la mise au point). J'ai donc abandonné le microscope pour la lunette avec laquelle cet inconvénient ne se produit pas.

En prenant comme source lumineuse une croisée de fils placée au foyer d'une lentille collimatrice, on peut avec des lunettes de 12 cm d'ouverture évaluer une seconde d'angle et par suite une rotation du miroir d'une demi-seconde. En munissant la

⁽¹⁾ Le miroir intervenant par son moment d'inertie il y a intérêt à le prendre de petit diamètre, ce qui n'a pas grand inconvénient lorsque l'objet est vivement éclairé. Mais il ne faut pas le prendre trop mince, car les variations de température suffisent alors à déformer les images.

lunette d'un micromètre oculaire, on pourrait ainsi évaluer les très petites déviations.

J'ai trouvé plus commode de prendre comme objet lumineux une règle très vivement éclairée dont l'image dans le miroir plan se formait à 7 m de la lunette qui était elle-même à une distance du petit miroir mobile égale à 2 m.

Je me suis servi d'une lunette dont l'objectif avait une ouverture de 4 cm. Il était possible d'évaluer $\frac{1}{4}$ de mm, ce qui permettait de mesurer un angle de 12 secondes et une rotation de 6 secondes.

La formule de l'électromètre suppose réalisées des conditions de symétrie qu'il est difficile d'admettre lorsque l'aiguille est très rapprochée des plateaux. Aussi, ai-je préféré employer l'appareil comme un électroscope. Au début et à la fin de chaque série d'expériences, je lisais les déviations correspondant à des différences de potentiel connues, qui étaient entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5... Une pile de Callaud de 10 éléments était fermée sur une résistance totale de 10 000 ohms prise sur deux boîtes. Deux fiches placées sur l'une des boîtes étaient en communication avec l'électromètre. On faisait varier la résistance des deux boîtes en ajoutant d'un côté ce que l'on enlevait de l'autre, de façon à maintenir la somme constante et égale à 10 000 ohms. Pour avoir des repères, je me servais d'éléments fixes qui avaient été étalonnés.

L'emploi de l'électromètre dans le cas de la méthode idiostatique, comporte une cause d'erreur à laquelle il faut bien prendre garde. En effet, l'aiguille qui est

en communication métallique avec l'une des paires de quadrants, n'est pas au même potentiel qu'elle : la différence est égale à la force électromotrice de contact des deux métaux (aluminium, acier) qui constituent l'aiguille et les plateaux.

La formule de l'électromètre

$$C = K(V_1 - V_2) \left(V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right)$$

devient

$$C = K(V_1 - V_2) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2} + \alpha \right]$$

α étant la différence de potentiel au contact. Au lieu de se réduire dans le cas du montage idiostatique à

$$V = V_1$$

$$C = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2}$$

Elle se réduit à

$$C = K(V_1 - V_2) \left(\frac{V_1 - V_2}{2} + \alpha \right)$$

Si on change les communications

$$C' = K(V_1 - V_2) \left(\frac{V_1 - V_2}{2} - \alpha \right)$$

$$\frac{C + C'}{2} = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2}$$

Il suffit de faire deux lectures.

Mais supposons qu'il s'agisse de différences de potentiel alternatives : ce qu'on mesure, c'est

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} C dt = \frac{K}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{(V_1 - V_2)^2}{2} dt + \frac{K\alpha}{T} \int_0^{\tau} (V_1 - V_2) dt$$

Le dernier terme est nul.

Ainsi, il faut faire la correction lorsque la différence de potentiel à mesurer est continue (dans le tarage de l'instrument), il ne faut pas la faire lorsque cette différence de potentiel est alternative.

Lorsqu'on se sert de l'électromètre pour mesurer une différence de potentiel entre les deux extrémités AB d'une résistance parcourue par un courant alternatif, on introduit entre ces points une capacité en dérivation et par suite on modifie la différence de potentiel. En conduisant les calculs sous la forme des exponentielles imaginaires on trouve qu'il faut appliquer au résultat lu un coefficient de correction.

$$K = (1 - CL\omega^2)^2 + C^2R^2\omega^2$$

La capacité de l'électromètre étant faible, ce coefficient se réduit à 1.

En effet, si nous prenons une capacité égale à 2 unités CGS électrostatiques, en unités électromagnétiques C est de l'ordre de 10^{-20} . Si R est de l'ordre des dix mille ohms, c'est-à-dire de l'ordre de 10^{13} unités CGS magnétiques, L dans le cas le plus défavorable que j'ai employé (6 téléphones) de l'ordre de 1 henry = 10^9 unités CGS, ω de l'ordre de 3 000 les 2 termes sont de l'ordre de 10^{-5} et de 10^{-8} .

Mesure de l'intensité du courant alternatif. Étude de l'électro-dynamomètre de Giltay. Ses inconvénients. — Les électro-dynamomètres fondés sur l'action des courants sur les courants ne sont pas assez sensibles pour mesurer les courants téléphoniques. J'ai pris un électrodynamomètre de Weber, dont j'ai allégé le système mobile en remplaçant les pièces en cuivre par des pièces en aluminium et le fil de cuivre de la bobine mobile par du fil d'aluminium. Ce qui permet de le suspendre au moyen d'un bifilaire constitué par des fils très fins $\left(\frac{1}{20} \text{ de mm}\right)$.⁽¹⁾

Le couple antagoniste $C = \frac{P}{h} \sin \theta$ se trouve réduit lorsqu'on diminue P.

Un inconvénient grave de l'appareil, c'est que par suite de son moment d'inertie considérable, il oscille indéfiniment. Je lui ai appliqué un amortisseur à liquide : pour cela, j'ai allongé les étriers qui supportent la bobine, et sous la barre soutenue par le fil, j'ai placé une palette plongeant dans la glycérine. Pour soustraire l'instrument au champ magnétique extérieur, je l'ai enfermé dans une cage en fer doux épais.

J'ai réalisé ainsi un instrument pratique qui donnait le dix-millième d'ampère, mais qui était insuffisant pour mesurer les courants téléphoniques.

⁽¹⁾ Le couple de torsion d'un bifilaire comprend en plus du terme dû à l'ensemble des deux fils, deux termes dus à la torsion propre de chacun des fils, dont l'effet se fait sentir lorsque, par le rapprochement des fils, le premier terme devient faible, et que l'on a par suite intérêt à diminuer.

L'électro-dynamomètre Giltay Bellati. Ses inconvénients. Étude de l'appareil. — C'est le seul qui soit sensible aux courants téléphoniques. Il repose sur l'aimantation du fer doux.

Un faisceau de fils de fer très doux fait un angle α avec l'axe d'une bobine dans laquelle passe le courant à mesurer. La composante parallèle au faisceau, du champ $H = GI$ créé par la bobine, est

$$GI \cos \alpha.$$

Elle produit une aimantation proportionnelle

$$BGI \cos \alpha$$

B étant le coefficient d'aimantation.

La composante du champ normale à la direction de l'aiguille de fer, est

$$GI \sin \alpha.$$

Le couple agissant est donc

$$BvG^2I^2 \sin \alpha \cos \alpha.$$

On le mesure dans l'appareil de Giltay par un bifilaire que j'avais remplacé par un fil de torsion

$$C\theta = \frac{1}{2} BvG^2I^2 \sin 2\alpha.$$

Le maximum de sensibilité a lieu au voisinage de $\alpha = 45^\circ$. Il faudra donc prendre cette direction de 45° comme position d'équilibre.

On mesure ainsi

$$I^2 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt.$$

Seulement cet appareil admet que l'aimantation est bien proportionnelle à I et que dans le cas d'un courant alternatif il ne se produit pas de différence de phase entre l'aimantation et le courant. Or, supposons qu'il n'en soit pas ainsi. Soit $I = A \sin \omega t$, le courant et $BA \sin (\omega t - \varphi)$ l'aimantation. On mesurera

$$\frac{1}{T} A^2 \int_0^T \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) dt = \frac{1}{T} \frac{A^2}{2} \cos \varphi.$$

La phase intervient par le cosinus de son angle. Donc si φ est variable avec les circonstances dans lesquelles on se trouve, on n'aura pas un appareil de mesure.

J'ai vérifié qu'il en était bien ainsi. Je prenais un diapason dont la bobine d'entretien portait un second enroulement dans lequel se développait par induction une force électro-motrice alternative. Je faisais passer le courant de ce second circuit dans une résistance sans self-induction ni capacité et dans l'électro-dynamomètre.

Je mettais les extrémités d'une partie connue de la résistance en communication avec l'électromètre. je trouvais ainsi :

$$\frac{1}{T} \int_0^T r^2 i^2 dt = \frac{r^2}{T} \int_0^T i^2 dt$$

Je comparais les indications à celles de l'électro-dynamomètre placé dans le circuit. Je renversais le courant pour être sûr qu'il n'y avait point de partie continue dans l'intensité, ce qui aurait été mis en évidence à cause du magnétisme remanent de l'aiguille impossible à éviter.

J'ai opéré avec des intensités différentes et des sons différents.

J'ai trouvé que l'électrodynamomètre n'était pas comparable à lui-même, et devait être rejeté comme appareil de mesure.

Modifications de l'appareil de Giltay. — L'appareil peut servir dans les méthodes de zéro. Dans ce cas on peut le modifier de façon à accroître sa sensibilité.

Remplaçons le fil de torsion par un fil de cocon (ou mieux de quartz) et plaçons à l'intérieur de la cage de fer qui contient l'appareil un aimant pouvant donner un champ magnétique H aussi faible que l'on veut à l'endroit où se trouve l'aiguille en fer doux.

En faisant passer dans la bobine un courant

$$I = A \sin \omega t.$$

on superpose au champ H un champ

$$GA \sin \omega t$$

suivant l'axe de la bobine.

Soit α l'angle de la position d'équilibre du faisceau de fil de fer avec la direction du champ H , θ l'angle de la direction du champ avec l'axe de la bobine.

La composante du champ résultant suivant la direction de l'aiguille est

$$H \cos \alpha + GA \cos (\theta - \alpha) \sin \omega t$$

elle produira une aimantation

$$B[H \cos \alpha + A \cos (\theta - \alpha) \sin (\omega t - \varphi)].$$

Le champ perpendiculaire à la direction de l'aiguille est

$$H \sin \alpha - A \sin (\theta - \alpha) \sin \omega t.$$

Le couple agissant à l'instant t est donc

$$C = B\nu [H \cos \alpha + GA \cos (\theta - \alpha) \sin (\omega t - \varphi)] \\ [H \sin \alpha - A \sin (\theta - \alpha) \sin \omega t].$$

On mesure

$$\frac{1}{T} \int_0^T C dt$$

Qui doit être nul lorsque l'équilibre est atteint, on doit donc avoir

$$0 = \frac{H^2}{T} \int_0^T \sin \alpha \cos \alpha dt - \frac{1}{T} A^2 \int_0^T \sin (\theta - \alpha) \\ \cos (\theta - \alpha) \sin (\omega t - \varphi) dt$$

en remarquant que les termes qui contiennent

$$\int_0^T \sin \omega t dt$$

donnent zéro.

Donc

$$H^2 \sin 2\alpha = \frac{GA^2}{2} \sin 2(\theta - \alpha) \cos \varphi \\ \frac{GA^2}{2} = H^2 \frac{\sin 2\alpha}{\sin 2(\theta - \alpha) \cos \varphi}$$

Si $\theta = 45^\circ$ la formule se réduit à

$$\frac{GA^2}{2} = H^2 \operatorname{tg} 2\alpha \approx \frac{1}{\cos \varphi}$$

on peut donc sensibiliser l'appareil à volonté en réduisant H .

On peut transformer en électrodynamomètre un galvanomètre quelconque : il suffit de remplacer les petits aimants par des petits barreaux de fer très doux et d'enfermer l'appareil dans une cage en fer qui le soustrait à l'action du magnétisme extérieur.

Un nouvel oscillographe. — Je me suis servi d'un appareil qui permet de mesurer l'intensité des courants et de suivre la loi de leur mouvement.

Il est fondé sur l'action d'un champ magnétique puissant sur un fil fin qui est parcouru par le courant à mesurer et dont les déplacements sont observés avec un microscope ⁽¹⁾.

Supposons que le fil soit assez long pour que dans la partie située dans le champ il reste à peu près parallèle à lui-même dans le déplacement.

L'action du champ sur le fil parcouru par le courant I est HII . Le fil étant normal aux lignes de force.

La réaction élastique du fil pour un déplacement x est proportionnelle à ce déplacement. Représentons-la par Tx ⁽²⁾.

T étant égal à $384 \frac{EI}{l^3}$.

⁽¹⁾ M. Ader a proposé de se servir de ce dispositif pour recevoir les signaux télégraphiques transmis à travers les câbles sous-marins. Mais l'application de l'appareil aux courants alternatifs n'a pas encore été faite à ma connaissance.

⁽²⁾ La théorie de l'élasticité nous donne pour la flèche x d'une barre

L'équation du mouvement du fil sera donc

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = Hl - T x \quad (1)$$

Soit $E \sin \omega t$ la force électro-motrice sinusoïdale qui produit le courant i qui existait dans le circuit avant l'introduction de l'oscillographe, P étant l'impédance du circuit correspondant à ω :

$$i = \frac{E}{P} \sin (\omega t - \theta)$$

On a quand l'oscillographe est dans le circuit :

$$L \frac{di}{dt} + Ri = Hl \frac{dx}{dt} + E \sin \omega t \quad (2)$$

De (1) on tire I . Si on porte dans (2) il vient :

$$\begin{aligned} \frac{Lm}{Hl} \frac{d^3 x}{dt^3} + \frac{Rm}{Hl} \frac{d^2 x}{dt^2} + \left(\frac{LT}{Hl} - Hl \right) \frac{dx}{dt} + \frac{RT}{Hl} x \\ = E \sin \omega t \end{aligned}$$

L'intégrale de cette équation comprend deux termes :

$$x = y + z.$$

encastée à ses deux extrémités et supportant une charge P répartie sur sa longueur

$$x = \frac{1}{8 \times 48} \frac{Pl^3}{EI}$$

l est la longueur de la barre, E le coefficient d'élasticité, I le moment d'inertie.

Inversement la force élastique développée par une déformation x sera

$$P = 384 \frac{EI}{l^3} x.$$

Le second terme ζ est une intégrale particulière de la forme :

$$\zeta = M \sin(\omega t - \varphi).$$

Le premier γ est l'intégrale générale de l'équation sans second membre. Il se compose de trois exponentielles dans lesquelles les coefficients du temps sont les racines ρ de l'équation caractéristique. Or, le coefficient du terme en ρ^3 est toujours petit. Le rapport des coefficients des termes en ρ^3 et en ρ^2 est $\frac{L}{R}$. Une des racines ρ est donc très grande et l'exponentielle correspondante est nulle. Les deux autres exponentielles sont alors données par l'équation privée des termes du troisième ordre. On peut les grouper sous la forme $e^{-\alpha t} \sin(\beta t - \gamma)$.

Le terme en γ est un terme amorti qui disparaît. De sorte que le mouvement est donné par le second terme seul, lorsque l'état permanent est atteint ⁽¹⁾. C'est un mouvement sinusoïdal de même période que le courant qui le produit.

M dépend de la période, mais suivant une loi connue qui permet de passer d'un son à un autre par un coefficient de correction. Plus simplement, il suffit d'étalonner l'instrument pour chaque période par comparaison avec l'électromètre.

Pour se servir de cet appareil comme oscillographe il suffit de stroboscooper le mouvement du fil. On a alors le mouvement aussi ralenti qu'on veut et on

(1) C'est une application du théorème général de M. Cornu sur la synchronisation des mouvements, que l'on retrouve à la base de la théorie de tous les oscillographes.

peut par suite en étudier la loi. On pourrait aussi faire porter au fil un petit disque en aluminium percé d'un trou; et photographier l'image très éclairée du trou donnée par un microscope sur un papier sensible animé d'un mouvement perpendiculaire.

L'avantage de cet appareil sur les oscillographes employés, c'est qu'il est très sensible, qu'il n'est pas fondé comme certains d'entre eux sur le phénomène complexe de l'aimantation du fer, et enfin qu'il n'introduit pas dans le circuit une self-induction ou une résistance appréciables.

Pour le réaliser j'ai pris un grand électro-aimant de Faraday à bobines horizontales avec des armatures tronconiques percées d'un trou, de façon qu'un faisceau lumineux pouvait suivre l'axe de tout l'appareil. Entre les deux armatures était placé un fil de platine vertical de $1/50$ de millimètre qui était tendu entre deux petites lames formant ressort, portées elles-mêmes sur deux glissières. Celles-ci se trouvaient sur deux pièces montées sur une potence fixée à la culasse de l'appareil, sur laquelle elles pouvaient glisser de haut en bas. De cette manière on pouvait tendre le fil à volonté, et on pouvait aussi lui donner par les deux glissières un mouvement d'avant en arrière.

L'une des bobines de l'électro-aimant était transformée en un véritable tube porte-microscope. Pour cela on avait monté au moyen de bouchons dans le trou des armatures un objectif de microscope, et dans le trou correspondant à l'autre extrémité un oculaire muni d'un micromètre.

Par l'axe de l'autre bobine on faisait arriver un

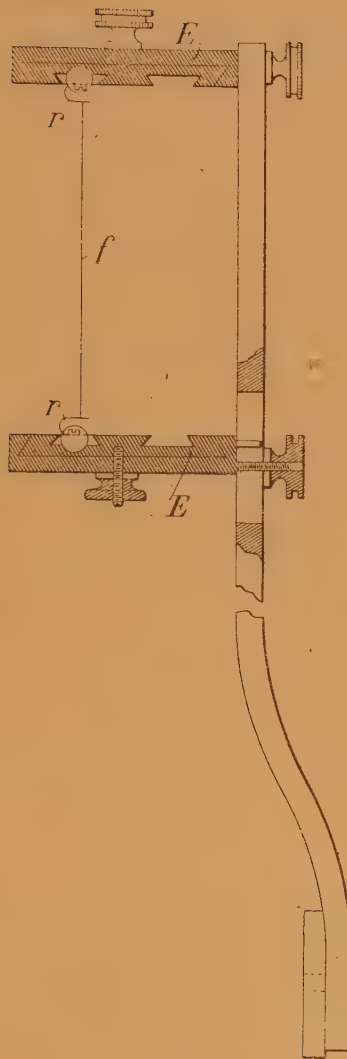


Fig. 1. — Oscillographe.

f, Fil de platine de 1/50 de mm., parcouru par le courant; *rr*, ressorts très légers; *E*, glissières en ébonite.

faisceau lumineux concentré au moyen d'une lentille.
Un ampèremètre sensible permettait de noter au

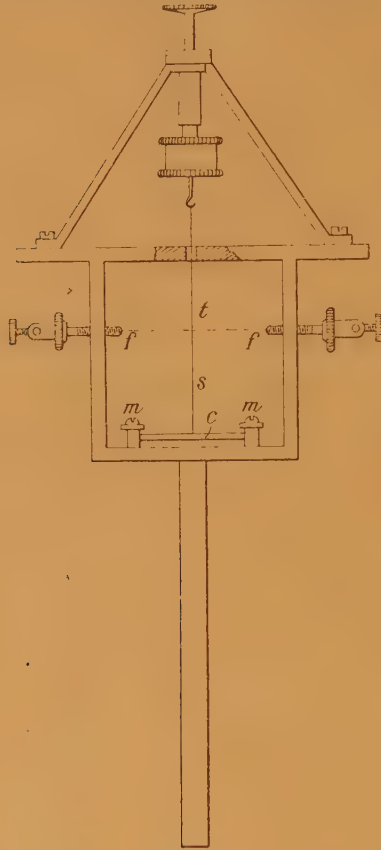


Fig. 2. — Relai microphonique.

ff, Fil de platine parcouru par le courant téléphonique; *s*, fil de soie; *t*, fil de ciontchouc; *mm*, microphone; *c*, charbon du microphone.

moment des mesures le courant qui excitait l'électro-aimant.

Un relai microphonique. — J'ai transformé suivant l'indication de M. Lippmann cet appareil en un relai microphonique.

Le fil tendu horizontalement entre les deux armatures d'un électro-aimant porte en son milieu un fil de soie qui soutient un très petit charbon de microphone. Un fil élastique que l'on peut tendre par un petit mouvement de pompe placé à la partie supérieure permet de diminuer l'effet du poids du charbon sur le fil.

On peut remplacer le fil de soie par un petit fil de caoutchouc.

Le microphone est fermé sur une pile locale et le primaire d'une bobine d'induction.

Un téléphone placé dans le secondaire rend un son correspondant à la période du courant.

Le coefficient M dépendant de ω les divers sons seront amplifiés différemment et il devra y avoir altération du timbre. Mais on peut, faisant varier les éléments dont on dispose trouver des valeurs critiques pour lesquelles cette altération est très faible.

L'instrument a l'avantage de n'introduire dans le circuit ni self-induction ni résistance appréciables. On pourrait donc en mettre sur la ligne autant qu'on voudrait ⁽¹⁾.

(1) On sait l'effet nuisible produit sur l'intensité du courant lorsqu'on place un téléphone en dérivation au départ. Avec le relai introduit dans la ligne l'inconvénient ne se produirait pas.

CHAPITRE II

APPAREILS SERVANT AUX MESURES ACOUSTIQUES

Les sources sonores. — Appareil de mesure pour l'intensité des sons.
— Mesure de l'amplitude du mouvement de la membrane du microphone et de la plaque du téléphone. — Etude de la vibration des plaques encastrées sur leur bord.

Les sources sonores. — Pour avoir des sons constants et pouvoir m'assurer de leur régularité j'ai employé deux procédés.

Je me suis servi d'abord de tuyaux sonores que je faisais parler au moyen de l'air comprimé ⁽¹⁾ enfermé dans un tube en acier, muni d'un régulateur du système de M. Fournier.

J'ai constaté par les procédés que j'indiquerai plus loin que l'intensité du son restait remarquablement constante. En manœuvrant une vis du régulateur, on la faisait varier à volonté ⁽²⁾.

Malheureusement la production du son dans un

(1) Cet air m'était livré à 120 atmosphères par la Société de l'Oxygène. Pour les expériences de courte durée, je le comprimais moi-même à une pression beaucoup moindre au moyen d'une pompe de Gay Lussac montée sur un moteur électrique.

(2) Ce dispositif très simple remplace avantageusement une soufflerie munie de son régulateur, appareils encombrants dans lesquels on ne peut maintenir le son constant et qui exigent la présence d'un aide.

tuyau s'accompagne du mouvement de translation, d'une grande masse d'air qui vient choquer la membrane du microphone et est de nature à fausser les

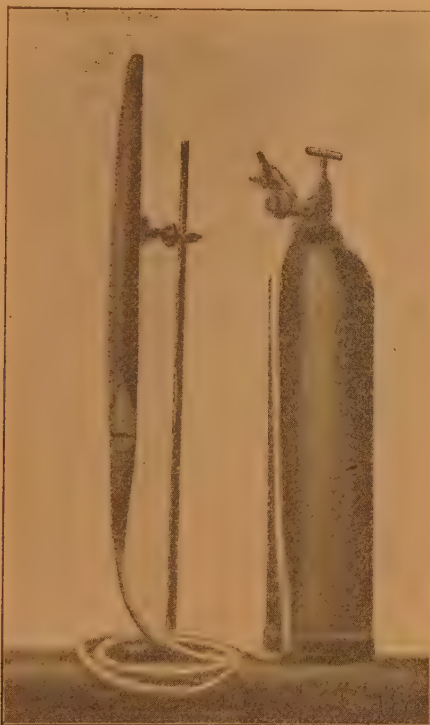


Fig. 3. — Dispositif permettant de faire parler les tuyaux sonores au moyen de l'air comprimé enfermé dans un réservoir muni d'un régulateur.

résultats. Aussi, ai-je renoncé à employer ces appareils.

Je me suis servi alors de diapasons entretenus élec-

triquement, du système de M. Mercadier, montés sur une caisse de résonance. C'est celle-ci qui constitue la source : c'est un tuyau sonore dans lequel il n'y a pas de mouvement de translation de l'air. De plus le son est tout à fait constant.

Le diapason portait un petit miroir plan dans lequel on pointait au moyen d'une lunette l'image d'un point lumineux éloigné très petit. Le réticule de la lunette était remplacé par un micromètre oculaire analogue à celui des microscopes. Lorsque le diapason vibrait on voyait une ligne lumineuse dont la longueur lue sur le micromètre mesure avec précision l'amplitude de la vibration du diapason pourvu que les distances des deux objets restent les mêmes.

Par une variation de la pile d'entretien, ou même par un simple réglage de la platine sur laquelle appuie le style d'entretien, on modifie à volonté l'amplitude du son.

Appareil de mesure pour l'intensité des sons. — Pour pouvoir comparer les effets des sons de période différente il fallait pouvoir rapporter la vibration du diapason à celle de la tranche d'air correspondant au microphone. Il fallait donc avoir un appareil de mesure des intensités sonores.

Je n'ai pas employé les flammes manométriques de Kœnig dont le mode de fonctionnement est inconnu et semble dépendre de plusieurs variables.

J'ai également rejeté la méthode optique qui consiste à former des franges d'interférence avec deux faisceaux écartés, et à interposer sur le trajet, de l'un d'eux une couche d'air vibrant, puis à observer le

déplacement des franges par la stroboscopie, bien qu'elle soit très séduisante puisqu'elle n'exige l'interposition d'aucun corps solide et qu'elle permette de mesurer la vibration de l'air lui-même. Il est d'abord difficile d'observer et de garder des franges dans le voisinage d'un corps en vibration, le moindre mouvement d'air (dû aux variations de température) suffisant à les faire disparaître. De plus si on ne fait pas traverser au faisceau une couche vibrante de largeur considérable la méthode manque de sensibilité, car elle met en jeu les variations d'indice dues aux variations de pression, qui sont très faibles.

Jamin en étudiant la variation d'indice de l'air avec la pression par les franges a trouvé ⁽¹⁾ qu'à une variation de pression de 1 mm de mercure, correspondait pour une longueur d'air de 1 m un déplacement d'une demi-frange, le déplacement étant proportionnel à la longueur parcourue.

Soit

$$y = A \sin \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$$

le déplacement de la tranche d'air. La pression est liée au déplacement par l'équation

$$-\frac{dp}{dx} = \rho \frac{d^2 y}{dt^2}$$

ρ étant la masse de l'unité de volume du gaz.

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. 49.

Or p est de la forme

$$\begin{aligned} p &= B \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \\ \frac{dp}{dx} &= 2\pi \frac{B}{\lambda} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= -A \omega^2 \sin \left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right). \end{aligned}$$

Identifiant :

$$2\pi \frac{B}{\lambda} = A \omega^2. \quad B = A \omega^2 \frac{\lambda}{2\pi}.$$

or

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi N$$

(N nombre de vibrations à la seconde).

$$\begin{aligned} \lambda &= VT = \frac{V}{N} \\ \frac{2\pi BN}{V} &= A \rho 4\pi^2 N^3 \\ B &= 2\pi N V \rho A. \end{aligned}$$

Prenons les unités CGS.

$$V = 33\,000, \quad \rho = 0,0013 \quad N = 500.$$

et soit A égal 0,01 cm. (ce qui est un déplacement qui comme nous le verrons peut se mesurer facilement).

$$B = 1\,323.$$

La variation maximum $2B$ de la pression est donc 2 646.

Donc la variation de pression est de 2 646 dynes sur un centimètre carré.

1 mm de mercure sur 1 cm² exerce une pression de 1330 dynes. Donc la variation maxima de pression correspond à 2 mm de mercure.

Si la tranche d'air sur laquelle on opère a 2 dcm de largeur, à 1 mm de mercure correspond 1/10 de frange, donc on aura dans ce cas 1/5 de frange, c'est-à-dire quelque chose d'à peine mesurable. Or, il est déjà difficile d'opérer sur une largeur d'air de 2 dcm. Il faut en effet avoir une onde bien plane.

M. Raps en 1893, a appliqué la méthode optique à l'étude des nœuds des tuyaux sonores, où la variation de pression est infiniment plus grande, puis dans l'air libre à l'étude des sons des voyelles⁽¹⁾. Bien antérieurement, M. Lippmann avait donné à son cours le principe de la méthode et mis le phénomène en évidence, dans le cas des tuyaux sonores.

Sur le conseil de M. Lippmann, j'ai cherché à mesurer directement la vibration au moyen du microscope.

J'ai d'abord placé à l'endroit voulu un objet très léger suspendu de façon à avoir un faible moment d'inertie et je l'ai observé au microscope. En prenant des feuilles de papier à cigarette, puis des feuilles d'or je n'ai pu faire aucune observation, le corps léger étant perpétuellement en mouvement sous l'action des mouvements de déplacement de l'air qui se produisent toujours.

(1) *Wiedemann Annalen*, 1889.

M. Raps reconnaît que les observations sont très difficiles et qu'il faudrait augmenter beaucoup la sensibilité de la méthode dans le cas de la mesure des sons à l'air libre, ce qu'on pourrait faire par des réflexions successives.

J'ai alors pris une feuille d'or étroite (de 1,5 mm environ) que j'ai suspendue dans une boîte en carton, portée sur la platine d'un microscope, en face d'une fente formant le fond d'une sorte d'entonnoir prismatique par où arrivait l'onde aérienne. L'un des côtés de la boîte portait une ouverture par laquelle passait l'objectif du microscope avec lequel on observait la feuille d'or par la tranche. Le côté opposé portait une fenêtre fermée par une lame de mica qui permettait d'éclairer vivement l'objet.

Même dans ces conditions, il est difficile de maintenir la feuille immobile. Lorsqu'on y parvient, si on fait arriver l'onde sonore, elle ne participe pas au mouvement.

Il semble que, quand l'air rencontrant un obstacle de petites dimensions peut passer à côté, il se produit un glissement et l'obstacle reste immobile. Il faut que la membrane enregistreuse ait une certaine étendue et soit placée au fond d'un tuyau, même très court.

Je me suis servi du dispositif suivant que j'ai trouvé excellent, et qui constitue un véritable appareil de mesure des intensités sonores. Une membrane en boudin caoutchoutée, très légèrement tendue est placée sur un petit tambour. Au centre de cette membrane, j'ai collé un tout petit disque de verre (qui était une fraction d'un couvre-objet de microscope) et sur celui-ci, tout droit, un fil de verre rigide portant à son extrémité une petite feuille d'aluminium mince percée d'un trou.

Le fil de verre étant en bout et n'appuyant que par sa base, suivra simplement le mouvement de la mem-

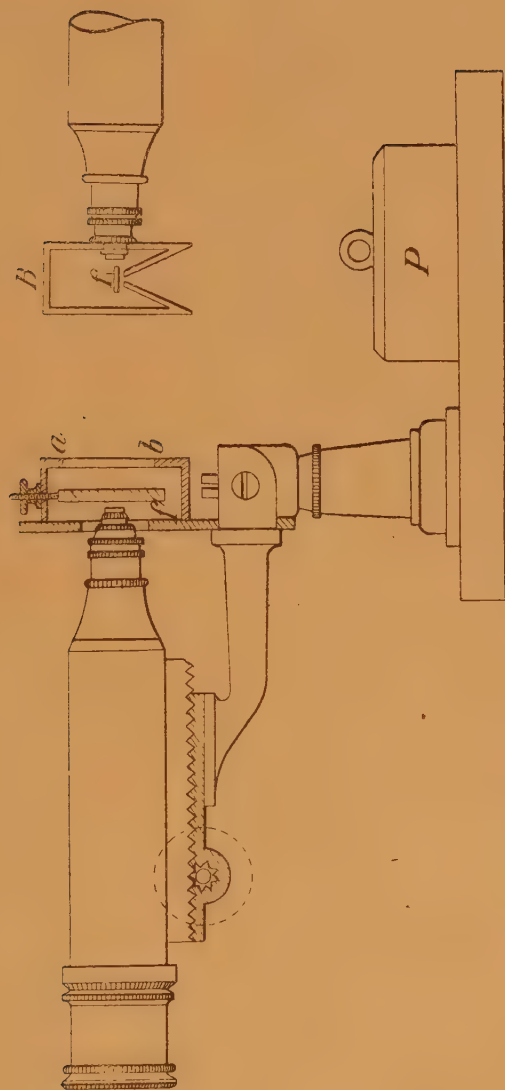


Fig. 4. — Appareil établi en vue d'observer avec un microscope une feuille d'or frappée par l'onde sonore.

f. Feuille d'or; B, boîte de carton servant de supports; *ab*, fenêtre fermée par un lame de mica; P, contre-poids.

brane et aura un mouvement de translation suivant sa propre direction.

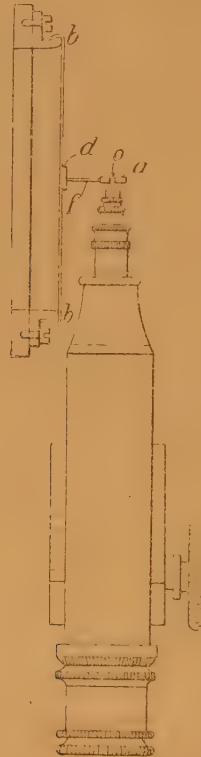


Fig. 5. — Appareil permettant de mesurer l'amplitude de la vibration sonore par le mouvement d'une membrane en baudruche caoutchoutée.

bb, Membrane; *d*, disque en verre; *f*, fil de verre; *a*, disque en aluminium percé d'un trou *O*.

Je pointais avec un bon microscope muni d'un micromètre oculaire, le petit trou très vivement

éclairé. En produisant un son devant la membrane, on voyait l'image se déplacer et donner une traînée lumineuse dont la longueur mesure l'amplitude de la vibration.

Mais on peut craindre que le mouvement observé ne soit autre chose que le mouvement propre de la membrane ⁽¹⁾ ou n'en dépende. Pour être certain qu'il n'en était pas ainsi, et que j'observais bien le mouvement de la tranche d'air, je me suis servi successivement de la méthode stroboscopique et des courbes de Lissajous.

J'ai employé le dispositif stroboscopique de M. Lippmann, qui a l'avantage d'être très simple, et de permettre de maintenir aussi longtemps qu'on veut, un mouvement qui n'est autre que le mouvement réel que l'on ralentit à volonté.

On fait passer devant la source lumineuse les trous d'un disque en cuivre, porté par une dynamo excitée en série, dont on peut faire varier la vitesse. Le mouvement est rendu très régulier au moyen d'un frein électrique, le disque passant entre les deux branches d'un électro-aimant qui développe des courants de Foucault d'autant plus intenses que la vitesse est plus grande, ce qui régularise le mouvement. Au moyen d'un rhéostat on fait varier l'aimantation de l'électro-aimant et par suite la puissance du frein. On prend comme source lumineuse un trou éclairé, très petit, placé contre le disque en cuivre

(1) On sait que quand on produit brusquement un son complexe très élevé devant une membrane avec un coup de sifflet p , e , celle-ci continue à vibrer pour son propre compte.

ou mieux l'image réelle formée sur le disque d'un trou très éloigné. Au moyen d'une première lentille, on envoie le faisceau au voisinage de l'organe en mouvement qu'il s'agit de stroboscooper, et on concentre par une seconde lentille, ce qui per-

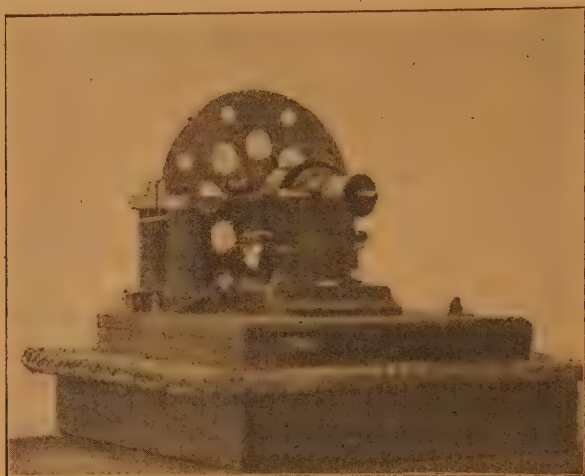


Fig. 6. — Appareil stroboscopique de M. Lippmann.

met d'éloigner autant qu'on veut les uns des autres, la source, le stroboscope, et le corps en mouvement ⁽¹⁾.

Une partie du faisceau est renvoyée par un miroir sur le diapason source sonore. Au moment où la stroboscopie du diapason est atteinte, celle de l'image du trou dans le microscope se produit aussi. Dans le

⁽¹⁾ Ceci aura surtout de l'importance lorsqu'il s'agira de stroboscooper des anneaux colorés.

mouvement stroboscopé, l'image du trou reste au point constamment (l'appareil étant bien réglé) ce qui indique que le mouvement du style est une translation suivant sa propre direction, et représente par suite en vraie grandeur le mouvement du centre de la membrane.

En enlevant l'oculaire du microscope on peut projeter le mouvement sur un écran.

On peut encore craindre qu'il n'y ait introduction d'harmoniques, ce que la stroboscopie ne peut pas mettre en évidence, à moins d'employer la méthode élégante due à M. Lippmann qui consiste à éclairer une fente par un faisceau se déplaçant avec l'appareil stroboscopeur (diapason avec miroir) et d'éclairer, par l'intermédiaire de cette fente, le corps en mouvement, puis de compter les images.

Je me suis simplement servi des courbes de Lissajous.

L'image réelle donnée par le microscope est renvoyée par un miroir fixe sur le petit miroir mobile porté par le diapason vibrant. On s'arrange de façon que le mouvement du style et celui du diapason soient perpendiculaires. On met au point l'image définitive sur un écran. La nature de la courbe indiquera s'il y a unisson ou production d'harmoniques.

J'ai toujours trouvé l'unisson.

Cette question de la mesure de l'amplitude des vibrations est très importante pour tous ceux qui s'occupant de phonétique, cherchent à mettre en évidence les différentes notes qui interviennent dans la formation d'une voyelle.

Les flammes manométriques de Kœnig que l'on a

employée sont été accusées (par comparaison avec les résultats du phonographe) de ne pas suivre exactement les vibrations de l'air et d'introduire leurs vibrations propres. Sans vouloir entrer dans l'étude de cette question, je puis dire que si le fait est vrai, cela ne tient pas à la membrane qui obéit fidèlement au mouvement qu'elle reçoit.

Mesure de l'amplitude du mouvement de la membrane du microphone et de la plaque du téléphone ⁽¹⁾. — Je me suis servi du phénomène des anneaux colorés, les déplacements étant trop petits pour être observés au microscope, et de la stroboscopie.

L'appareil comprend un cercle vertical fixé sur un pied très lourd, sur lequel par trois vis à pas très fins et des ressorts antagonistes, vient s'appuyer un second cercle que l'on peut à volonté fixer invariablement au premier au moyen de trois mâchoires munies de vis. Sur ce second cercle, on collait la membrane du microphone qui portait en son centre un petit disque en verre destiné à former les anneaux.

Devant la membrane se trouvait un second plan de verre, monté dans un barillet, que l'on pouvait déplacer d'avant en arrière et fixer par une vis et qui portait une lentille convergente de court foyer (10 cm. environ); on formait au foyer de cette lentille une image très petite de la source que l'on pouvait placer très loin et dans une direction perpen-

⁽¹⁾ Cet appareil a été exécuté par M. Jobin, le très habile opticien, qui s'est prêté à tous mes essais avec un désintéressement amical dont je ne saurais trop le remercier.

diculaire à l'axe de l'appareil, la lumière étant renvoyée au moyen d'un petit prisme à réflexion totale.

Le faisceau tombe parallèlement sur le système de la lame fixe et du petit disque en verre et si la source

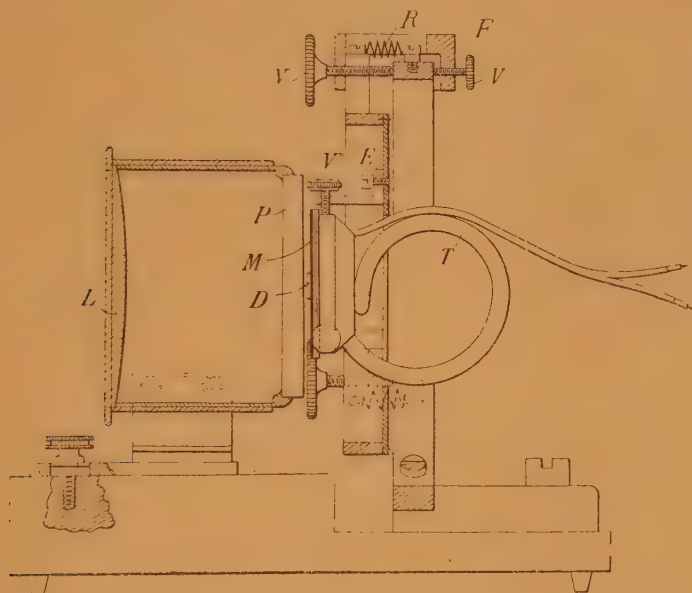


Fig. 7. — Appareil permettant de mesurer l'amplitude du mouvement de la membrane du téléphone.

T, téléphone dont la membrane M porte un petit disque plan en verre D; P, plan de verre formant les anneaux avec D; L, lentille convergente; V, vis de serrage; R, ressort antagoniste; F, mâchoire d'arrêt; E, équerre; V', vis supportant le téléphone.

est monochromatique, on voit les anneaux en plaçant l'œil au point où les rayons qui sortent de l'appareil viennent converger, point qui est très nettement défini.

La source est un brûleur Bunsen contenant une cuillère en platine avec un peu de sel marin.

On forme les anneaux au contact. Puis on s'éloigne progressivement en manœuvrant les trois vis jusqu'à atteindre le maximum qui suit la septième ou huitième extinction. On a alors entre les deux verres une distance de 2 mm, ce qui est très important pour supprimer les effets de la viscosité de l'air et les effets dus à l'attraction des deux plaques qui doivent se produire au contact.

On fait vibrer la source sonore derrière l'appareil : les franges se brouillent, on leur rend leur netteté en stroboscopant le faisceau. On les voit alors se mouvoir lentement.

On forme un quadrillage sur la plaque de verre qui est en avant. On mesure sur ce quadrillage le déplacement des franges.

Pour étudier les vibrations de la plaque téléphonique, j'ai fixé sur le centre mobile une plaque de métal qui portait un trou et trois équerres munies de vis, de façon à pouvoir placer en son centre le téléphone. Au milieu de la plaque téléphonique était collé le petit disque de verre. On opérait comme précédemment.

Etude de la vibration des plaques encastrées sur leurs bords. — J'ai fixé sur le cercle mobile une plaque de verre bien travaillée de 115 mm de diamètre, dont l'épaisseur était telle qu'elle pouvait servir de plaque microphonique (1 mm environ).

CHAPITRE III.

LES MÉTHODES DE MESURE

Conditions des expériences. — Mesure des éléments du circuit primaire. — Mesure des éléments du circuit secondaire. — Mesure de la force électromotrice en circuit ouvert. — Mesure de l'intensité. — Mesure de la différence de potentiel aux bornes de téléphone. — Mesure de l'énergie absorbée dans le téléphone. — Mesure de l'amplitude de la vibration aérienne. — Mesure de la vibration de la plaque du téléphone et de la planchette du microphone. — Etude expérimentale de la nature de la vibration des plaques encastrées sur leur bord.

Dans toutes mes expériences, le circuit primaire comprenait la pile, le microphone, le primaire de la bobine d'induction et une résistance auxiliaire. Le circuit secondaire comprenait : le secondaire de la bobine transmettrice et deux téléphones, une ligne artificielle variable, système de Branville et Anizan, dont les effets sont comparables, comme la pratique l'a montré, à ceux d'une ligne réelle de même valeur nominale, deux téléphones et le secondaire d'une bobine d'induction.

Le microphone était du système d'Arsonval, à réglage magnétique. Les charbons verticaux portent une chemise en fer sur laquelle agit un aimant que l'on rapproche ou que l'on éloigne au moyen d'une vis. On a ainsi un appareil dont on peut faire varier la sensibilité.

Le récepteur était soit un téléphone d'Arsonval à aimant annulaire, soit un téléphone Aubry dont l'électro-aimant est porté par une petite membrane mobile, soit un téléphone Ochorowicz.

Je me plaçais chaque fois dans le cas du son le plus fort susceptible d'être transmis sans crachements, ce qui est facilité par ce fait que le phénomène des crachements fait varier brusquement toutes les quantités qui interviennent; puis dans le cas d'un son que l'on pouvait entendre dans le téléphone par l'intermédiaire de l'air, enfin, dans le cas du son le plus faible perceptible en appliquant le téléphone contre l'oreille et par suite se transmettant mécaniquement. Son qui correspond à une vibration extrêmement petite.

J'ai retrouvé toujours les mêmes résultats, de sorte que les nombres que j'indique plus loin ont une véritable signification.

Seulement j'avais soin d'attendre un certain temps que l'état permanent fut établi, afin d'éliminer les phénomènes variables dus aux extracourants et aux effets thermo-électriques. A cause de cela, il y a peut-être une différence entre la transmission des sons musicaux et la transmission de la parole articulée dont le mécanisme, d'après les théories admises, se compose de l'émission d'une série de sons musicaux complexes correspondant aux voyelles, séparés par la fermeture plus ou moins complète de l'orifice générateur, correspondant aux consonnes. On s'explique ainsi ce fait que la perception de la parole articulée en téléphonie est beaucoup plus facile que celle d'un son musical.

Je me suis borné à l'étude des sons musicaux.

Devant la planchette du microphone et à une distance donnée, était le diapason vibrant monté sur sa caisse de résonance et portant un petit miroir plan. A une distance assez grande, se trouvait un trou vivement éclairé. Le faisceau réfléchi par le petit miroir était renvoyé au moyen d'un prisme à réflexion totale dans une direction perpendiculaire et on l'observait avec la lunette munie du micromètre oculaire, dont la lecture pouvait être faite en même temps que celle de l'appareil galvanométrique. La longueur de la traînée lumineuse dans la lunette constituait un repère qui, en se reportant aux expériences d'enregistrement des ondes sonores, permettait d'avoir l'amplitude de la vibration aérienne qui frappait le microphone.

Mesure des éléments du circuit primaire. — Des commutateurs à mercure bien isolés permettaient d'établir à chaque instant les différentes communications.

On mesurait le courant avec l'ampèremètre divisé en milliampères, en faisant la lecture avec la loupe, le microphone étant au repos.

Le diapason étant en vibration, on mesurait l'amplitude de son mouvement.

On mettait alors en communication avec l'électromètre monté en hétérostatique les deux extrémités de la résistance auxiliaire. On notait la déviation. On arrêtait le diapason, on notait la nouvelle déviation, on avait ainsi la variation moyenne de l'intensité du courant

$$\frac{1}{T} \int_0^T r i dt = \frac{r}{T} \int_0^T i dt.$$

On recommençait, le diapason vibrant avec la même amplitude (ce qui est facile ; lorsque le réglage est bien fait cela se réalise tout seul), en opérant sur le microphone comme on avait opéré sur la résistance.

On opérait ensuite de même avec l'électromètre monté en hetérostatique. On avait ainsi en mettant les bornes de la résistance auxiliaire en communication avec l'électromètre

$$\frac{1}{T} \int_0^T r^2 i^2 dt = \frac{r^2}{T} \int_0^T i^2 dt.$$

c'est-à-dire l'intensité efficace du courant.

On faisait varier successivement les divers éléments : amplitude de la vibration, hauteur du son transmis.

Mesure des éléments du circuit secondaire. Force électromotrice en circuit ouvert. — On mettait en communication avec l'électromètre monté en idio-statique les deux bornes de la bobine après avoir coupé la communication avec la ligne.

Mesure de l'intensité. — On pouvait se servir soit de l'oscillographe, soit de l'électromètre. Dans le premier cas il fallait mettre dans le circuit le fil de l'oscillographe après avoir réglé la vitesse du stroboscope. On notait la déviation. On se rapportait à un étalonnage de l'appareil fait au préalable par comparaison avec l'électromètre, avec la même période de courant.

Dans le second cas, on remplaçait la ligne et tous les appareils, sauf la bobine transmettrice et le téléphone récepteur, par une résistance sans self-induc-

tion et surtout sans capacité. Les effets de capacité sont ici très importants puisqu'il s'agit de grandes résistances. On avait des bobines enroulées de façon à satisfaire à ces conditions ('). On réglait la résistance de façon à avoir la même intensité de son dans le téléphone récepteur. On mesurait à l'électromètre la différence de potentiel aux bornes d'une résistance connue. On avait

$$\frac{1}{T} \int_0^T R^2 i^2 dt$$

ou

$$R^2 \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt.$$

On en déduisait l'intensité efficace.

Mesure de la différence du potentiel aux bornes du téléphone. — Je plaçais dans le circuit secondaire six téléphones identiques et je mesurais la différence de potentiel. L'effet était ainsi multiplié par 36.

Bien entendu je diminuais la longueur de la ligne de façon à avoir la même intensité de son.

Mesure de l'énergie absorbée dans le téléphone. — Je me suis servi de la méthode des trois voltmètres, qui ici étaient remplacés par l'électromètre avec lequel on faisait successivement les trois lectures.

On plaçait dans le secondaire les six téléphones et une résistance sans self-induction ni capacité.

(¹) On peut prendre soit le mode d'enroulement indiqué par M. Chaperon *Comptes rendus*, T. 108, soit celui que j'ai donné *Comptes rendus*, T. 120.

Soit en AB l'appareil dont on veut mesurer l'énergie, en BC la résistance.

Soit u la différence de potentiel entre A et B à l'instant t , u_1 la différence entre A et C, u_2 entre B et C, i l'intensité du courant, r la résistance.

L'énergie absorbée entre A et B est dans une seconde

$$\frac{1}{T} \int_0^T u i dt.$$

On a

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2 + u & u_2 &= r i \\ u_1 &= r i + u \end{aligned}$$

Donc

$$u^2_1 = u^2 + r^2 i^2 + 2 u r i$$

$$\frac{2r}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \int_0^T u^2_1 dt - \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt - \frac{1}{T} \int_0^T u^2_2 dt.$$

Les trois termes de second membre constituent justement les différences de potentiel efficaces données par la lecture de l'électromètre. Ici la méthode s'applique très bien r étant très grand et les trois indications étant du même ordre de grandeur.

Mesure de l'amplitude de la vibration aérienne. —

On se servait de la membrane en baudruche caoutchoutée munie d'un style dont on observait le mouvement au microscope.

Mesure de la vibration de la plaque du téléphone. —

Je collais sur le téléphone avec du Baume de Canada un petit disque en verre mince et j'observais les anneaux stroboscopés avec l'appareil déjà décrit.

J'ai pris d'abord un disque infiniment mince qui ne pouvait pas être travaillé optiquement et qui donnait un grand nombre d'anneaux : je m'attendais à trouver une vibration de plusieurs microns. Mais quand j'ai vu que l'amplitude de la vibration n'atteignait pas un micron, j'ai pris un disque un peu plus épais, travaillé optiquement avec grand soin qui, sur 1 1/2 cm, donnait une seule frange, de manière à pouvoir évaluer les fractions de frange. Malheureusement le phénomène est trop petit pour qu'on puisse étudier comment il dépend des divers éléments : intensité du courant, hauteur du son, etc.

Froehlich, en étudiant le mouvement de la plaque du téléphone, avait trouvé pour l'amplitude de ce mouvement des centièmes de millimètre. Je crois que ses chiffres sont beaucoup trop forts. Il se servait d'un rayon réfléchi et amplifiait ainsi le mouvement par un levier optique de multiplication considérable. Il se peut qu'il ait mal évalué les bras de levier, il se peut aussi qu'actionnant le téléphone par un courant microphonique produit par la voix il y ait eu des crachements. Or, j'ai constaté que dans ce cas tous les éléments étaient brusquement augmentés.

Mesure de la vibration de la planchette du microphone. — On plaçait la planchette du microphone sur l'appareil, après avoir collé sur elle le disque en verre destiné à donner les anneaux.

Etude de la vibration d'une plaque encastrée sur ses bords. — On plaçait sur l'appareil une lame de verre de 1 mm d'épaisseur avec laquelle on pourrait

constituer un microphone et on la mastiquait sur les bords avec de la magnésie et du silicate de potasse. On formait les anneaux, on faisait parler un tuyau derrière l'appareil, on stroboscopait ; le mouvement des anneaux était déterminé au moyen d'un quadrillage placé sur le plan de verre fixe. On fixait ensuite la lame avec des vis en l'appuyant soit par l'intermédiaire d'une bande mince de caoutchouc (comme cela a lieu pour le microphone), soit par l'intermédiaire de rondelles de carton ou de rondelles de cuivre comme cela a lieu pour la membrane du téléphone.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

J'appellerai dans ce qui va suivre :

R , la résistance auxiliaire exprimée en ohms ;

D , la distance du diapason au microphone, en millimètres ;

Δ_1, Δ_2 , les lectures de la lunette qui donnent les amplitudes des mouvements du diapason dans les différents cas ;

V , la différence de potentiel aux bornes de la résistance auxiliaire au repos ;

V_1', V_2' , les différences de potentiel moyennes, mesurées pendant les vibrations 1, 2 ;

V_1'', V_2'' , les différences de potentiel efficaces ;

$U, U_1', U_2', U_1'', U_2''$, les mêmes quantités mesurées aux bornes du microphone ;

i , l'intensité du courant primaire au repos ;

p_1, p_2 , les fractions du courant initial qui représentent les variations moyennes de ce courant pendant les vibrations 1, 2 ;

q_1, q_2 , les fractions du courant initial qui représentent les variations efficaces de ce courant ;

E , la force électromotrice dans le secondaire, mesurée en circuit ouvert ;

I, l'intensité efficace du courant secondaire à l'arrivée ;

O, la différence de potentiel efficace aux bornes d'un téléphone à l'arrivée.

W, l'énergie absorbée dans un téléphone à l'arrivée.

N. B. — La pile était constituée par des éléments Bloc —.

TABLEAU I

Diapason $La_3 = 435$ V.D, 3 éléments, $R = 29,8$
 $D = 175$ mm $\Delta_1 = 23$ $\Delta_2 = 12$
 Son perçu à 20 km de ligne souterraine. — 1 son le plus fort transmissible sans crachements.
 $V = 2,31$ $V = 2,31$ $U = 1,44$ $U = 1,44$
 $V'_1 = 2,38$ $V''_1 = 2,46$ $U'_1 = 1,35$ $U''_1 = 1,28$
 $V'_2 = 2,35$ $V''_2 = 2,37$ $U'_2 = 1,39$ $U''_2 = 1,37$
 $i = 0,078$ $p_1 = 0,03$ $p_2 = 0,017$ $q_1 = 0,28$ $q_2 = 0,14$

N. B. — Les amplitudes des ondes sonores sont les mêmes que pour le tableau V.

TABLEAU II

Diapason $La_1 = 435$ V.D, 3 éléments, $R = 24,8$
 $D = 175$ mm $\Delta_1 = 18$ $\Delta_2 = 13$
 Son perçu à 20 km de ligne souterraine.
 $V = 2,17$ $V = 2,17$ $U = 1,56$ $U = 1,56$
 $V'_1 = 2,23$ $V''_1 = 2,28$ $U'_1 = 1,48$ $U''_1 = 1,43$
 $V'_2 = 2,21$ $V''_2 = 2,23$ $U'_2 = 1,50$ $U''_2 = 1,48$
 $i = 0,087$ $p_1 = 0,028$ $p_2 = 0,018$ $q_1 = 0,22$ $q_2 = 0,13$

N. B. — Mêmes amplitudes d'ondes sonores que pour le tableau VII pour Δ .

TABLEAU III

Diapason $L\alpha_3$ 435 VD, 3 éléments, $R=29,8$
 $D=180$ mm $\Delta_1=25$ $\Delta_2=19$ (Δ_1 correspond au
 son le plus fort transmissible sans crachements.)
 Son perçu à 20 km de ligne souterraine.
 $V=2,26$ $V'=2,26$ $U=1,37$ $U'=1,37$
 $V''_1=2,33$ $V'''_1=2,42$ $U'_1=1,28$ $U''_1=1,21$
 $V'_2=2,31$ $V''_2=2,35$ $U'_2=1,31$ $U''_2=1,28$
 $i=0,076$ $p_1=0,031$ $p_2=0,022$ $q_1=0,29$ $q_2=0,19$

TABLEAU IV

Diapason $Ut_4=512$ VD, 3 éléments, $R=24,5$
 $D=175$ mm $\Delta_1=24$ $\Delta_2=17$ (Δ_1 correspond au
 son le plus fort transmissible sans crachements.)
 Son perçu à 20 km de ligne souterraine.
 $V=2,11$ $V'=2,11$ $U=1,58$ $U'=1,58$
 $V''_1=2,17$ $V'''_1=2,23$ $U'_1=1,50$ $U''_1=1,40$
 $V'_2=2,15$ $V''_2=2,17$ $U'_2=1,55$ $U''_2=1,50$
 $i=0,087$ $p_1=0,029$ $p_2=0,019$ $q_1=0,24$ $q_2=0,14$

TABLEAU V

Diapason $Ut_4=512$ VD 3 éléments $R=29,8$
 $D=170$ mm $\Delta_1=25$ $\Delta_2=13$ (Δ_1 correspond au
 son le plus fort transmissible sans crachements.)
 Son perçu à 20 km de ligne souterraine.
 $V=2,36$ $V'=2,36$ $U=1,48$ $U'=1,48$
 $V''_1=2,42$ $V'''_1=2,50$ $U'_1=1,39$ $U''_1=1,31$
 $V'_2=2,40$ $V''_2=2,42$ $U'_2=1,42$ $U''_2=1,38$
 $i=0,079$ $p_1=0,029$ $p_2=0,019$ $q_1=0,27$ $q_2=0,13$
 N. B. — Mêmes amplitudes d'ondes sonores que pour le
 tableau I.

TABLEAU VI

Diapason $Ut_4=512$ VD, 3 éléments. $R=98,8$
 $D=170$ mm $\Delta_1=26$ $\Delta_2=20$

Son perçu à 25 km de ligne souterraine.

$$\begin{array}{llll} V = 2,27 & V = 2,27 & U = 1,40 & U = 1,40 \\ V'_1 = 2,34 & V''_1 = 2,43 & U'_1 = 1,30 & U''_1 = 1,25 \\ V'_2 = 2,32 & V''_2 = 2,37 & U'_2 = 1,33 & U''_2 = 1,31 \\ i = 0,076 & p_1 = 0,031 & p_2 = 0,022 & q_1 = 0,29 \quad q_2 = 0,21 \end{array}$$

N. B. — Mêmes amplitudes d'ondes sonores que pour le tableau VIII.

TABLEAU VII

Diapason $Fa_4 = 684$ VD, 3 éléments, $R = 24,8$
 $D = 170$ mm $\Delta_1 = 22$ $\Delta_2 = 11$ (Δ_1 son le plus fort transmissible sans crachements.)

Son perçu à 20 km de ligne souterraine.

$$\begin{array}{llll} V = 2,13 & V = 2,13 & U = 1,60 & U = 1,60 \\ V'_1 = 2,20 & V''_1 = 2,25 & U'_1 = 1,52 & U''_1 = 1,47 \\ V'_2 = 2,18 & V''_2 = 2,19 & U'_2 = 1,54 & U''_2 = 1,52 \\ i = 0,086 & p_1 = 0,033 & p_2 = 0,024 & q_1 = 0,22 \quad q_2 = 0,10 \end{array}$$

N. B. — Mêmes amplitudes d'ondes sonores que pour le tableau II pour Δ_1 .

TABLEAU VIII

Diapason $Fa = 684$ VD, 3 éléments, $R = 29,8$

$D = 170$ mm $\Delta_1 = 29$ $\Delta_2 = 22$

$$\begin{array}{llll} V = 2,20 & V = 2,20 & U = 1,35 & U = 1,35 \\ V'_1 = 2,27 & V''_1 = 2,36 & U'_1 = 1,26 & U''_1 = 1,22 \\ V'_2 = 2,25 & V''_2 = 2,30 & U'_2 = 1,28 & U''_2 = 1,26 \\ i = 0,074 & p_1 = 0,032 & p_2 = 0,023 & q_1 = 0,28 \quad q_2 = 0,22 \end{array}$$

N. B. — Mêmes amplitudes d'ondes sonores que pour le tableau VI.

TABLEAU IX

Diapason $Fa = 684$ VD, 3 éléments, $R = 24,8$

$D = 175$ mm $\Delta_1 = 24$ $\Delta_2 = 13$

Son perçu à 25 km de ligne souterraine.

$$\begin{array}{llll} V = 2,10 & V = 2,10 & U = 1,55 & U = 1,55 \\ V'_1 = 2,16 & V''_1 = 2,21 & U'_1 = 1,46 & U''_1 = 1,39 \\ V'_2 = 2,13 & V''_2 = 2,14 & U'_2 = 1,50 & U''_2 = 1,48 \\ i = 0,085 & p_1 = 0,028 & p_2 = 0,014 & q_1 = 0,22 \quad q_2 = 0,10 \end{array}$$

TABLEAU X

Diapason $La_3 = 435$ VD, 3 éléments, $R = 24,8$

$$D = 170 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 17 \quad \Delta_2 = 11$$

Son perçu à 15 km de ligne souterraine.

$$\begin{array}{llll} E_1 = 1^v,4 & I_1 = 9 \times 10^{-5} & O_1 = 6 \times 10^{-2} & W_1 = 3 \times 10^{-6} \\ E_2 = 0,9 & I_2 = 6 \times 10^{-5} & — & — \end{array}$$

N. B. — Mêmes amplitudes sonores que le tableau XVII.

TABLEAU XI

Diapason $La_3 = 435$ VD, 3 éléments, $R = 29,8$

$$D = 175 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 18 \quad \Delta_2 = 9$$

$$\begin{array}{llll} E_1 = 1^v,2 & I_1 = 8 \times 10^{-5} & O_1 = 6 \times 10^{-2} & W_1 = 2 \times 10^{-6} \\ E_2 = 0,6 & I_2 = 4 \times 10^{-5} & — & — \end{array}$$

N. B. — Mêmes amplitudes sonores que le tableau XIV.

TABLEAU XII

Diapason $La_2 = 435$ VD, 3 éléments, $R = 29,8$

$$D = 175 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 23 \quad \Delta_2 = 12 (\Delta_1 \text{ son le plus fort transmissible}).$$

Son perçu à 20 km de ligne souterraine.

$$\begin{array}{llll} E_1 = 1^v,5 & I_1 = 10 \times 10^{-5} & O_1 = 7 \times 10^{-2} & W_1 = 4 \times 10^{-6} \\ E_2 = 0,8 & I_2 = 5 \times 10^{-5} & — & — \end{array}$$

TABLEAU XIII

Diapason $Ut_4 = 512$ VD, 3 éléments, $R = 29,8$

Son perçu à 25 km de ligne souterraine.

$$D = 170 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 26 \quad \Delta_2 = 13$$

$$E_1 = 17,8 \quad I_1 = 10 \times 10^{-5} \quad O_1 = 8 \times 10^{-2} \quad W_1 = 4 \times 10^{-6}$$

$$E_2 = 0,9 \quad I_2 = 5 \times 10^{-5} \quad - \quad -$$

N. B. — Mêmes amplitudes sonores que le tableau XVI.

TABLEAU XIV

Diapason $Ut_4 = 512 \text{ VD}$, 3 éléments, $R = 29,8$
 $D = 175 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 20 \quad \Delta_2 = 10$
 Son perçu à 20 km de ligne souterraine.
 $E_1 = 17,4 \quad I_1 = 8 \times 10^{-5} \quad O_1 = 7 \times 10^{-2} \quad W_1 = 2 \times 10^{-6}$
 $E_2 = 0,7 \quad I_2 = 4 \times 10^{-5} \quad - \quad -$

N. B. — Mêmes amplitudes sonores que le tableau XI.

TABLEAU XV

Diapason $Ut_4 = 512 \text{ VD}$, 3 éléments, $R = 24,5$
 $D = 180 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 21 \quad \Delta_2 = 8$
 Son perçu à 15 km de ligne souterraine.
 $E_1 = 17,7 \quad I_1 = 9 \times 10^{-5} \quad O_1 = 8 \times 10^{-2} \quad W_1 = 3 \times 10^{-6}$
 $E_2 = 0,7 \quad I_2 = 3,5 \times 10^{-5} \quad - \quad -$

TABLEAU XVI

Diapason $fa_4 = 614 \text{ VD}$, 3 éléments, $R = 29,8$
 $D = 155 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 25 \quad \Delta_2 = 12$
 Son perçu à 25 km de ligne souterraine.
 $E_1 = 27,3 \quad I_1 = 10 \times 10^{-5} \quad O_1 = 10 \times 10^{-2} \quad W_1 = 5 \times 10^{-6}$
 $E_2 = 1,1 \quad I_2 = 5 \times 10^{-5} \quad O_2 = 5 \times 10^{-2}$

N. B. — Mêmes amplitudes sonores que le tableau XIII.

TABLEAU XVII

Diapason $Fa_4 = 684 \text{ VD}$, 3 éléments, $R = 24,8$
 $D = 170 \text{ mm} \quad \Delta_1 = 20 \quad \Delta_2 = 10$
 Son perçu à 15 km de ligne souterraine.
 $E_1 = 27,2 \quad I_1 = 9 \times 10^{-5} \quad O_1 = 9 \times 10^{-2} \quad W_1 = 3 \times 10^{-6}$
 $E_2 = 1,1 \quad I_2 = 5 \times 10^{-5} \quad O_2 = 5 \times 10^{-2}$

N. B. — Mêmes amplitudes sonores que le tableau X.

TABLEAU XVIII

Diapason $Fa_4 = 684$ VD, 3 éléments, $R = 29,8$			
$D = 175$ mm	$\Delta_1 = 21$	$\Delta_2 = 8$	
Son perçu à 10 km de ligne souterraine.			
$E_1 = 1^{\text{v}},8$	$I_1 = 7 \times 10^{-5}$	$O_1 = 7 \times 10^{-2}$	
$E_2 = 0,6$	$I_2 = 3 \times 10^{-5}$	—	

CHAPITRE V

CONCLUSIONS

Au phénomène qui produit le courant microphonique correspond dans le circuit primaire un courant alternatif dû à la variation de résistance du microphone qui se superpose au courant principal, et dont l'intensité efficace est une fraction de l'intensité de ce courant qui reste la même quand on fait varier cette dernière. Pour les sons les plus intenses qui seront perceptibles dans le téléphone, elle correspond à $1/4$ environ. Cette variation alternative est accompagnée d'une variation continue plus faible et qui ne doit pas jouer de rôle dans la transmission d'un son musical; mais qui en joue probablement un dans la transmission de la parole. L'intensité efficace du courant alternatif primaire est à peu près proportionnelle à l'amplitude de la vibration sonore qui actionne l'appareil ⁽¹⁾. Elle ne semble pas dépendre de la hauteur du son.

La force électromotrice efficace en circuit ouvert dans le secondaire est d'environ 1,5 volt pour les sons

⁽¹⁾ Maxwell pensait qu'elle devait en être indépendante. *Nature* t. XVIII.

les plus forts qui puissent être reçus dans le cas du La_3 . La force électromotrice maxima correspondante est donc de 2,2 volt.

Elle varie à peu près comme l'amplitude de la vibration de l'onde sonore agissant sur l'appareil microphonique.

Elle dépend de la période et varie en sens inverse de celle-ci.

L'intensité efficace du courant secondaire (dans le cas de la pratique où le courant comprend la ligne, les secondaires des deux bobines d'induction à l'arrivée et au départ, et les quatre téléphones) pour le son le plus fort transmis est de l'ordre des cent-millièmes d'ampères. Elle descend jusqu'au millionième d'ampère pour des sons encore très nettement perceptibles. Elle est sensiblement proportionnelle à l'amplitude de l'onde sonore. Elle ne semble pas varier avec la période. L'action sur la membrane téléphonique étant proportionnelle à l'intensité du courant, le déplacement de cette membrane lui sera proportionnel d'après la théorie de l'élasticité.

Donc ce déplacement sera proportionnel à l'amplitude de l'onde agissante, et ne dépendra pas de la période.

La différence de potentiel aux bornes du téléphone est représentée par des centièmes de volt dans le cas du son le plus fort.

L'énergie absorbée dans le téléphone dans l'unité du temps est représentée dans le cas où elle est la plus grande par des millionièmes de Watt.

On peut conclure de ces résultats expérimentaux que les sons ne doivent pas être modifiés d'une façon

différente par le téléphone et par suite que le timbre ne doit pas être trop altéré.

Ce point avait été mis théoriquement en évidence par Helmholtz⁽¹⁾. Il tient à la self-induction considérable des appareils qui se trouvent sur la ligne.

Prenons les cas où je me suis placé et qui correspondent à la pratique.

J'avais sur la ligne deux bobines de 175 ohms environ de résistance et ayant une self-induction de 0,5 henry, soit : 350 ohms et 1 henry.

Plus quatre téléphones d'Arsonval de 200 ohms de résistance et ayant une self-induction de 0,2 h., soit 800 ohms et 0,8 h. En tout 1,150 ohms et 1,8 h.

Les appareils interviennent par leur résistance apparente.

$$\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}.$$

Prenons un son de 600 périodes $\omega = 3,750$ environ.

R^2 est de l'ordre de 10^6

$L^2 \omega^2$ de l'ordre de 50×10^6 .

Le terme dû à la self-induction est prépondérant : la résistance apparente de l'ensemble des appareils varie comme ω , c'est-à-dire en raison inverse de la période.

L'effet de la ligne est complexe : elle intervient par sa résistance, par sa résistance d'isolement, par sa self-induction et sa capacité qui agissent en sens inverse (et donnent la self-induction apparente), par

(1) Wiedemann *Annalen*, t. V.

la self-induction et la capacité de sa résistance d'isolement. Si on prend une ligne de 800 kilomètres en cuivre de 4 1/2 mm. (ligne Paris-Marseille) on a :

Pour l'ensemble de la résistance et de la résistance d'isolement environ 10^3 ohms. Pour la self-induction apparente de la ligne et de l'isolement des centièmes d'henry.

Le terme en R^2 est de l'ordre de 10^6 ; le terme en $L^2 \omega^2$ est de l'ordre de 2×10^3 .

La ligne, au point de vue de l'altération des sons intervient donc comme une résistance⁽¹⁾ et cette résistance n'est pas considérable vis à vis de la résistance apparente des appareils qui varie dans le sens de ω . Or, la force électro-motrice d'induction est $M \frac{dI}{dt} = M\omega \cos(\omega t - \varphi)$ sensiblement proportionnelle à ω (si on ne tient pas compte de la réaction du primaire). Donc l'intensité du courant doit très peu varier avec ω .

C'est ce que mes expériences ont vérifié.

La vibration de la membrane téléphonique et celle de la plaque microphonique sont de l'ordre d'une fraction de micron.

Au contraire, la vibration de la couche d'air⁽²⁾ est de l'ordre de plusieurs centièmes de millimètres.

(1) On sait que cette action se produit de deux façons, par l'affaiblissement du courant au départ, et par l'affaiblissement du rapport du courant à l'arrivée au courant au départ. Voir Vaschy. *Electricité et Magnétisme*, t. II.

(2) Ou tout au moins la vibration de la membrane élastique légère qui la mesure.

Le mouvement de la plaque est un mouvement d'ensemble. Lorsqu'elle est appuyée sur du caoutchouc ou sur du carton, c'est presque un mouvement de translation. Lorsqu'elle est fixée plus solidement, elle se creuse ou se bombe très légèrement au centre. Il n'y a jamais subdivision de la plaque en concamérations.

Ces recherches commencées au laboratoire de M. Cornu, à l'École Polytechnique, ont été continuées et achevées au laboratoire de M. Lippmann, à la Sorbonne. Je prie mes deux illustres maîtres d'agréer l'expression de ma profonde reconnaissance pour leurs excellents conseils et pour les facilités de travail qu'ils ont bien voulu m'accorder.

Vu et approuvé :

Paris, le 11 février 1899,

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 11 février 1899,

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
GRÉARD.

NOTE A

*Sur la signification des diverses quantités mesurées,
dans le cas où la variation alternative de résistance
est une fonction sinusoïdale simple.*

Supposons que la variation de résistance du microphone dans le cas où il est frappé par une onde sonore correspondant à un son musical simple, puisse se représenter par un terme continu et un terme sinusoïdal $r^1 = r(1 - a - b \sin \omega t)$.

A cette variation de résistance correspondra une variation de l'intensité du courant primaire qui comprendra une partie continue et une partie alternative. Cette dernière ne sera pas sinusoïdale, elle pourra être développée d'après la série de Fourier, ce qui introduira des termes en 2ω , 3ω , qui altéreront le timbre du son. Mais si la variation alternative est assez faible, on pourra négliger ces termes et écrire :

$$e' = i(1 + \alpha + \beta \sin(\omega t - \varphi)).$$

La self-induction du circuit primaire étant faible, φ sera assez petit.

On a $V = si$, s étant la résistance auxiliaire.

$$V^1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau si(1 + \alpha + \beta \sin(\omega t - \varphi)) dt$$

$$V' = si(1 + \alpha) \frac{V' - V}{V} = \alpha$$

$$V''^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau s^2 t^2 (1 + \alpha + \beta \sin(\omega t - \varphi))^2 dt$$

$$V''^2 = s^2 t^2 \left((1 + \alpha)^2 + \frac{\beta^2}{2} \right)$$

$$\frac{V''^2 - V'^2}{V^2} = \frac{\beta^2}{2}$$

$$U = ri$$

$$U' = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau ri (1 - \alpha - b \sin \omega t) (1 + \alpha + \beta \sin(\omega t - \varphi)) dt$$

$$U' = ri \left[(1 - \alpha)(1 + \alpha) + \frac{b\beta}{2} \cos \varphi \right]$$

ou encore :

$$U' = ri(1 + \alpha - a)$$

en négligeant les termes qui contiennent les produits $a\alpha$ et $b\beta$.

$$U''^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau r^2 i^2 (1 - \alpha - b \sin \omega t)^2 (1 + \alpha + \beta \sin(\omega t - \varphi))^2 dt$$

$$U''^2 = r^2 i^2 \left[(1 - \alpha)^2 (1 + \alpha)^2 + \frac{b^2 (1 + \alpha)^2}{2} + \frac{\beta^2 (1 - \alpha)^2}{2} - 2b\beta(1 + \alpha)(1 - \alpha) \cos \varphi \right]$$

$$= r^2 i^2 \left[(1 - \alpha)^2 (1 + \alpha)^2 + \frac{b^2 (1 - \alpha)^2}{2} + \frac{\beta^2 (1 - \alpha)^2}{2} - 2b\beta(1 + \alpha)(1 - \alpha) \right]$$

en négligeant le terme en $b\beta \sin^2 \frac{\varphi}{2}$, φ étant petit.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
AVANT-PROPOS.	I
HISTORIQUE	3
CHAPITRE PREMIER. — Les appareils servant aux mesures électriques.	7
CHAPITRE II. — Les appareils servant aux mesures acoustiques	24
CHAPITRE III. — Les méthodes de mesure.	39
CHAPITRE IV. — Les résultats.	51
CHAPITRE V. — Conclusions.	54

SECONDE THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

COMBINAISONS DE L'HYDROGÈNE
AVEC LES MÉTAUX

Vu et approuvé :

Paris, le 11 février 1899,

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 11 février 1899,

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

